

学校编码: 10384

分类号____密级____

学号: 32020111152713

UDC____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

脉冲涡流检测频域特征提取
与缺陷表征研究

Studies of Frequency-domain Feature Extraction and Defect
Characterization in Pulsed Eddy Current Testing

李岩松

指导教师姓名: 曾志伟 教授

专 业 名 称: 航空宇航制造工程

论文提交日期: 2014 年 04 月

论文答辩日期: 2014 年 05 月

学位授予日期: 2014 年 06 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2014 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

脉冲涡流检测是近年来发展迅速的一种比较先进的无损检测技术。由于脉冲激励频谱分量丰富，因此相比于传统的涡流检测技术，其可以同时检测到被测部件中不同深度的缺陷，获得更多的缺陷信息，在航空航天、核能电力、石油化工等领域有着广阔的应用前景。本文研究脉冲涡流检测的信号特征提取和缺陷表征方法，以提高脉冲涡流检测技术对缺陷的分类识别能力，从而推动脉冲涡流检测技术的进步。

目前对脉冲涡流检测缺陷识别的研究主要集中在时域上，对脉冲涡流丰富的频域信息的应用较少。脉冲激励信号可以被看作是一组多频不等幅正弦合成信号，由于趋肤效应的存在，高频成分仅受到上表面缺陷的影响，而低频成分会同时受到上、下表面缺陷的影响。本文选取能够充分表达缺陷位置、尺寸等信息的频域特征量，并分析不同缺陷参数对特征量的影响，进而进行缺陷的分类识别研究。针对腐蚀缺陷和铆钉孔边裂纹缺陷分别提出了频域缺陷分类识别判据，充分利用了脉冲激励频率分量丰富这一特点。该判据简单明确，通过提取信号的高、中、低频特征量，实现了对航空铝材上缺陷的位置、大小以及深度这三个主要参数的分类识别与比较。

相对于实验研究，仿真研究成本更低，研究更灵活，并且可以有效地避免实验研究中不确定因素带来的干扰。本论文首先采用基于电磁场理论编写的二维轴对称以及三维有限元仿真程序进行数值模拟，并通过实验验证仿真模型的正确性。

本研究将进一步丰富涡流无损检测理论，促进我国涡流无损检测技术的应用和发展。成果将可应用于检测飞机蒙皮或其他部件深处的细小缺损，对保障飞机安全，提高飞行可靠性和延长飞机寿命等方面有重要意义。

关键词：脉冲涡流检测； 频域分析； 特征提取

Abstract

Pulsed eddy current testing (PECT) is a nondestructive testing technique that develops fast in the recent years. The pulsed excitation comprises a broad band of frequencies and the response signal provides more information about defect than that of traditional eddy current testing. Therefore, PECT will play an important role in the maintenance of aircrafts, nuclear power plants, oil and gas transmission pipes and so on. The thesis studies feature extraction of PECT signals and defect characterization schemes to enhance the capability of PECT in defect classification and thus improve PECT technology.

Most literature studies PECT defect classification mainly in time domain, ignoring the rich frequency information of PEC signals. A pulse waveform can be expressed as a summation of a series of harmonics with unequal amplitudes. Subsurface defects only affect the low frequency components, whereas surface defects affect the high and low frequency components because of the skin effect. Features which can fully identify defect's location, radius, and height were selected and the effects of different defect parameters on the features were analyzed. The thesis fully exploits frequency-domain information of PECT signal and proposes defect characterization schemes for characterizing corrosion and cracks around rivet sites. The characterization schemes are simple and clear. More importantly, they can be used to identify defect's location, size, and depth.

Numerical simulation is a very useful, flexible and low-cost method for better understanding of PECT technology. Two finite element models, namely axisymmetric model and three-dimensional model, are utilized for PECT simulation. The models are validated by experiments.

The research will further ECT theories and promote the application and development of ECT. The achievements can be applied to detect small defects in aircraft skin and other components, which is meaningful for aircraft safety.

Key words: Pulsed eddy current testing; Frequency domain analysis; Feature extraction

厦门大学博硕士论文摘要库

目录

摘要.....	I
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 无损检测技术概述	2
1.3 涡流无损检测技术	3
1.3.1 涡流检测技术基本原理	3
1.3.2 涡流检测技术的发展历程	4
1.3.3 涡流检测的特点	6
1.4 脉冲涡流检测技术	7
1.4.1 脉冲涡流检测的历史及发展	8
1.4.2 脉冲涡流检测技术的研究热点	10
1.5 脉冲涡流检测信号特征提取的研究现状	11
1.6 本文主要研究工作	14
第二章 脉冲涡流检测技术的理论基础	17
2.1 脉冲涡流检测的工作原理	17
2.2 脉冲涡流的趋肤效应	18
2.3 涡流场的控制方程及数学表述	20
第三章 脉冲涡流检测的有限元分析与实验验证	25
3.1 脉冲涡流响应的计算	25
3.1.1 区域分解方法	25
3.1.2 瞬时响应的计算	26
3.2 实验验证	29
3.2.1 脉冲涡流检测系统	29
3.2.2 检测探头的设计	31
3.2.3 小波去噪	32

3.2.4 有限元模型的实验验证	35
3.3 脉冲涡流检测参数影响分析.....	38
3.3.1 探头有无磁芯的影响	39
3.3.2 激励脉冲频率的影响	40
3.3.3 激励脉冲电流幅值的影响	41
第四章 脉冲涡流检测频域特征提取与缺陷表征.....	43
4.1 腐蚀缺陷的信号特征提取与缺陷表征	43
4.1.1 仿真模型及网格划分	43
4.1.2 腐蚀信号频域特征量	44
4.1.3 腐蚀的表征	46
4.2 孔边裂纹的特征提取与缺陷表征	47
4.2.1 仿真模型及网格划分	47
4.2.2 孔边裂纹信号频域特征量	51
4.2.3 孔边裂纹的表征	54
4.2.4 简化的上表面裂纹表征	55
第五章 总结与展望	59
5.1 本文总结.....	59
5.2 展望.....	59
参考文献.....	61
攻读硕士期间发表的论文.....	66
致谢.....	67

Table of contents

Abstract	II
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Background and significance.....	1
1.2 Overview of nondestructive testing technique	2
1.3 Eddy current testing (ECT) technique.....	3
1.3.1 Principle of ECT	3
1.3.2 Development course of ECT.....	4
1.3.3 Features of ECT	6
1.4 Pulsed eddy current testing (PECT) technique.....	7
1.4.1 History and development of PECT	8
1.4.2 Research focus of PECT.....	10
1.5 Research status of PECT signal feature extraction	11
1.6 Main tasks of the thesis.....	14
Chapter 2 Theoretical basis of PECT technique	17
2.1 Principle of PECT	17
2.2 Skin effect of PECT	18
2.3 Governing equations and formulations of eddy current field	20
Chapter 3 Finite element (FE) analysis of PECT and experimental verification.....	25
3.1 Calculation of PECT response.....	25
1.3.1 Domain decomposition method	25
1.3.2 Computation of transient response.....	26
3.2 Experimental verification	29
3.2.1 PECT system.....	29

3.2.2 Design of probe	31
3.2.3 Wavelet de-noising	32
3.2.4 Experimental verification of FE modeling	35
3.3 Parametric study of PECT	38
3.3.1 Influence of ferrite core	39
3.3.2 Influence of frequency	40
3.3.3 Influence of current amplitude	41
Chapter 4 Frequency-domain feature extraction and defect characterization	43
4.1 Signal feature extraction and characterization of corrosion	43
4.1.1 FE model and meshing	43
4.1.2 Frequency-domain features of corrosion signal	44
4.1.3 Characterization of corrosion	46
4.2 Signal feature extraction and characterization of crack around rivet site	47
4.2.1 FE model and meshing	47
4.2.2 Frequency-domain features of crack signal	51
4.2.3 Characterization of crack around rivet site	54
4.2.4 Simplified characterization of surface crack	55
Chapter 5 Summary and prospect	59
5.1 Summary of the thesis	59
5.2 Future work	59
References	61
Appendix	66
Acknowledgement	67

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

飞机蒙皮和其他部件由于疲劳载荷及受到环境中如气温、湿度、紫外线辐射、酸雨等因素的影响，很容易出现裂纹、腐蚀或其他缺损。定期对这些部件进行无损检测 (Nondestructive testing, NDT)，对延长飞机寿命，保证飞机安全飞行是非常必要的^[1]。不仅如此，无损检测技术在飞机的整个寿命过程中都起着举足轻重的作用。飞机从各结构件的材料选择和比较到生产制造，直至使用过程中都需要无损检测技术来保证其整体性能符合适航性和安全性的要求^[2]。

近代制造航空航天器所用的材料，基本上以铝镁合金、钛合金、耐热合金以及新兴的碳纤维复合材料为主。这些材料所制作的各种航空航天器部件，大多都是在高温、高压、高应力等恶劣环境下工作。美国空军后勤中心在对二十余种现役飞机的详细调查中发现，由于腐蚀和裂纹原因导致的飞机损伤事故分别占总事故的百分之二十和三十。采用涡流检测 (Eddy current testing, ECT) 技术对腐蚀和裂纹进行检测，不仅可靠性高，而且无需在检测前对部件表面的积碳、油脂和保护层等进行清除，多数情况下可以做到不拆卸飞机，即对飞机进行外场原位探伤。因此，可以说涡流检测技术在航空工业生产和维护中发挥着越来越重要的作用^[3]。

然而传统涡流检测的效果容易受到提离等因素的影响。为了解决这一问题，发展出了多频涡流检测技术。它采用三个以上不同频率的激励在被检工件中产生涡流，通过对每个激励下的检测信号进行数据融合，有效地消除了提离的干扰。但是多频涡流检测也有其局限性，在每个检测位置都需要分别采集至少三个不同频率的响应信号进行检测，在探头扫描情况下，检测时间将成倍数增长^[4]。而且由于受到趋肤效应的影响，传统涡流检测技术和多频涡流检测技术的检测深度都比较有限，往往仅适用于检测表面和近表面缺陷。如果需要检测处于工件较深层的缺陷，就只能降低激励频率，但这样就会大大降低检测灵敏度。

在此背景下，脉冲涡流检测 (Pulsed eddy current testing, PECT) 技术应运而生。相对于传统的涡流检测，脉冲涡流检测以一系列脉冲电流（电压）作为激

励信号，其频谱分量非常丰富，在一次检测中就能完成多个频率的测试^[1]。此技术较以往的扫频方法节省了许多时间；而且信号能量集中，使感应电流能渗透到样品内部更深处，有效地扩大了检测范围。脉冲涡流检测具有良好的抗干扰能力，并且可实现对导体样品不同深度位置的检测^[5]。

为了帮助人们在物理意义上更好地认识脉冲涡流检测技术，并通过数据处理提高该技术对缺陷的识别分析能力从而进一步挖掘涡流检测的潜力，本论文应用有限元法 (Finite element method, FEM) 对脉冲涡流检测技术进行研究，给实验工作以指导，并在此基础上研究缺陷分类识别方法。日常大量的检测工作是由受过培训并取得资格认证的技术人员来执行的。这些技术人员一般属于熟练操作人员，而不是无损检测专家。因此，需指定简单、明确的检测程序、方法及判据来帮助检测人员对信号进行分析。实现对缺陷的正确评估是航空维修的目的之一，其了解飞机零部件的质量，保证飞机飞行安全有着重大意义。

1.2 无损检测技术概述

无损检测是一门涉及多学科的综合应用性技术，它以不损害被检对象的内部结构和使用性能为前提，应用多种物理原理和化学现象，对各种工程材料、零部件、结构件进行有效的检验和测试，检测被检对象中是否存在缺陷或不均匀性，进而评价它们的连续性、完整性、安全可靠性及某些物理性能^[6]。

据统计，现有的无损检测方法不少于 70 种。以德国科学家伦琴 1895 年发现 X 射线为标志，无损检测作为应用型技术学科已有一百多年的历史^[7]。到了二十世纪中期，建立了以磁粉检测 (Magnetic testing, MT)、渗透检测 (Penetrant testing, PT)、超声检测 (Ultrasonic testing, UT)、射线检测 (Radiographic testing, RT) 和涡流检测 (Eddy current testing, ECT) 五大常规检测技术为代表的无损检测体系^[8]。

磁粉检测技术利用被磁化的工件表面不连续处会形成漏磁场的特点，使磁粉聚集并重新排列，从而显示出缺陷的形状与位置。它显示缺陷直观，灵敏度高，检查速度快且成本低廉，因而被广泛地应用于铁磁性板材、型材、管材、锻造毛坯等原材料和半成品的检查，也可用于钢锻件、铸钢件加工过程中的工序间检查和中加工检查，还可以用于飞机、火车、汽车等运输工具的维修，以

及压力容器、石油储罐、锅炉等重要设备和机械的定期检查^[9]。

渗透检测就是把被检测的构件表面处理干净后施加渗透液，使之由于毛细作用而渗透到表面开口的细小缺陷中去，然后在去除零件表面残存的渗透液之后，用显像剂吸出已渗透到缺陷中去的渗透液并使之扩散，从而在零件表面显示出损伤或缺陷的图像。渗透检测对表面裂纹有很高的检测灵敏度。其缺点是操作工艺程序要求严格、繁琐，不能发现非表面开口的皮下和内部缺陷，检验缺陷的重复性差^[10]。

超声检测一般是指使超声波与试件相互作用，对反射、透射和散射的波进行研究，可应用于试件的宏观缺陷检测、几何特性测量、组织结构和力学性能变化的检测和表征。它应用范围广，设备轻便，对人体及环境无害。但是使用中一般需要使用耦合剂，而且对试件形状的复杂性也有一定限制^[11]。

射线检测是利用电磁辐射或者粒子辐射对被检物体进行照射，根据射线穿过物体的特性变化对物体进行检测。这种检测方法的主要优点是它能够得到被检测物体内部状况的图像。根据图像可直观地分析物体内部的缺陷和组织结构。可是这种检测所用的射线往往对人体有害^[12]。

无损检测技术是现代工业发展必不可少的有效工具，在一定程度上反应了一个国家的工业发展水平，其重要性已得到世界范围内的广泛公认。无损检测技术应用范围十分广泛，遍布工业发展的各个领域，在机械、建筑、冶金、电力、石油、造船、汽车、宇航、核能、铁路等行业中被普遍采用，成为不可或缺的质量保证手段，在产品的设计、生产和使用的各个环节中已被卓有成效地运用^[13-16]。

1.3 涡流无损检测技术

在交变磁场的作用下，导电材料内会产生涡流，涡流产生的磁场叠加在初始磁场上构成合成的交变磁场。通过检测和判断合成磁场的特性，就可以反推出试件的电磁性质。

1.3.1 涡流检测技术基本原理

根据法拉第电磁感应原理，将金属导体放置在变化着的磁场中，导体将不

断地切割磁力线，产生感应电动势，形成一个自闭合回路的电流。此电流我们称之为涡流，以上现象称为涡流效应。图 1.1.1 所示为涡流效应的原理图。

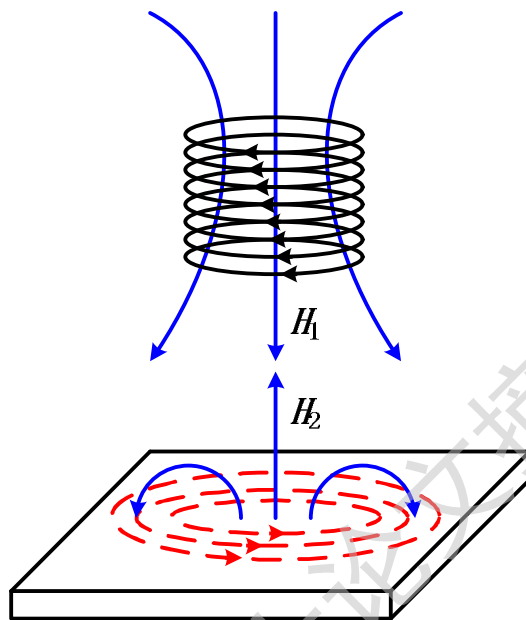


图 1.1.1 涡流检测原理示意图

当把通着交变电流的线圈靠近金属工件时，由于电磁感应，工件中会感应出涡流。涡流的大小、分布等与金属试块的状况有关。当金属试块中存在缺陷或电导率、磁导率等物理性能发生变化时，试块中的涡流就会发生变化，而涡流产生的磁场反作用于线圈，使线圈阻抗发生变化。因此，测定线圈阻抗的变化，就可得知金属试块中缺陷或其他物理性能变化的情况。

1.3.2 涡流检测技术的发展历程

从 1820 年奥斯特 (Ørsted) 发现了电流的磁效应至今，电与磁之间的联系已经被研究接近二百年了。安培 (Ampère)、法拉第 (Faraday)、麦克斯韦 (Maxwell) 等世界著名科学家不断探索，建立了系统严密的电磁场理论。时至今日，麦克斯韦方程组依然是电磁现象的研究基础，亦是涡流检测的理论基础 [17]。

1879 年，英国人休斯 (Hughe) 将涡流检测应用于判断不同的金属合金，进行材质分选，标志着涡流检测首次被应用于实践。1950 年前后，以德国科学

家福斯特 (Foster) 博士为代表的研究人员提出了阻抗分析方法, 为涡流检测机理的分析和设备研制提供了理论基础, 使涡流技术的发展得到了实质性的突破。福斯特因此被称为“现代涡流检测之父”^[17]。美国、前苏联、法国、英国和日本的科学家也先后作了大量的开创性工作, 发表了大量的论文, 并研制生产了一些涡流检测设备。在我国, 涡流检测技术的应用与研究可以追溯到上世纪 60 年代初。航空工业是最早使用涡流检测技术的行业之一。由于航空领域对于安全要求特别严格, 使得涡流检测技术在航空领域得到广泛重视和应用^[18-20]。此后, 电子技术尤其是计算机和信息处理技术的进一步发展, 促进了涡流检测技术与仪器的不断更新和进步。

随着人类科技不断进步, 工业化程度不断提高, 对材料和质量检测要求也不断提高。常规涡流检测技术自身存在的一些局限性, 如对提离敏感、检测速度慢以及探测深度小等问题就表现了出来^[21]。研究人员在原有涡流检测技术的基础上提出了一些新的涡流检测技术。除本文研究的脉冲涡流检测 (Pulsed eddy current testing, PECT) 技术以外还有涡流阵列检测 (Eddy current array testing, ECAT) 技术, 多频涡流检测 (Multifrequency eddy current testing, MECT) 技术、远场涡流检测 (Remote field eddy current testing, RFECT) 技术、磁光-涡流成像检测 (Magneto-optic/eddy current imaging, MOI) 技术等。这些新的涡流检测技术以各自独特的优点在不同的行业得到了广泛应用, 弥补了常规涡流检测技术的不足。下面对这几种涡流检测新技术作简单介绍。

涡流阵列检测采用的探头由多个独立工作的线圈构成。这些线圈按照特殊的方式排列, 且激励与检测线圈之间形成两种方向相互垂直的电磁场传递方式, 以利于发现走向不同的线性缺陷^[22]。使用多路技术 (Multiplexing) 采集数据, 可避免不同线圈之间的互感。涡流阵列检测具有检测效率高的优点。其对不同方向的线性缺陷具有一致的检测灵敏度, 并且可根据被检工件的尺寸和型面设计探头外形, 使之与工件形成良好的电磁耦合, 适合于复杂几何形状工件的检测。

多频涡流检测技术同时用多个频率信号激励探头, 利用不同频率下涡流信号有不同变化的原理来获取丰富信息。通过一定的方法进行分析处理, 从中提取出有用信息, 抑制干扰^[23]。目前, 多频涡流检测技术已经在生产实际中得到

了应用。由于它包含了单频涡流检测技术，又能胜任单频涡流检测无法完成的工作，因而具有强大的生命力。可以预见，随着涡流检测理论的深入研究和科学技术的迅速发展，多频涡流检测技术必将成为涡流检测的一个重要组成部分。

远场涡流检测技术发明于上世纪中叶，但直到八十年代才开始得到深入研究，并首先被应用于各种管状金属导体的检测。它是一种能穿透金属管壁的低频涡流检测技术。探头通常采用内通过式，由激励线圈和检测线圈构成，检测线圈与激励线圈相距约为管内径的两倍。激励线圈通以低频交流电，检测线圈能拾取发自激励线圈穿过管壁后又返回管内的涡流信号，从而有效地检测金属管子的内、外壁缺陷和管壁的厚度。远场涡流检测有着检测深度大的优点，对管壁内外的缺陷具有相同的灵敏度^[24]。

磁光-涡流成像检测中应用的磁光效应 (Magneto-optic effect) 是指处于磁化状态的物质与光之间发生相互作用而引起的各种光学现象。法拉第旋转效应 (Faraday's rotation effect) 是磁光效应中的一种。线性偏振光透过置于磁场中的物质，沿着磁场方向传播时，光的偏振面发生旋转，旋转的角度与物质的厚度及沿物质敏感轴的磁感应强度有关。磁光成像检测利用加载于铜箔中的交流电在导电工件中感应出的电流所产生的磁场来判断工件是否完好。如果工件是完好均匀的，则涡流分布是均匀的，不产生垂直方向的磁场，穿过磁光薄膜的偏振光不旋转；如果工件中有不连续处，则涡流分布将发生改变，产生垂直方向的磁场，后者作用于磁光薄膜的敏感轴上，改变偏振光的偏振角度，从而得到反映不连续情况的图像^[25]。

1.3.3 涡流检测的特点

作为五大常规无损检测方法之一的涡流检测技术是建立在电磁感应原理基础上的一种无损检测方法，主要适用于导电材料缺陷的检测，具有以下优点^[26]：

- (1) 非接触检测，能穿透非导体涂镀层，可以在不清除零件表面油脂、积碳和保护层的情况下进行检测。
- (2) 单面检测，便于进行原位检测，即在不拆解或少拆解检测对象的情况下进行检测。
- (3) 检测无需耦合剂，有利于实现检测自动化，并可以在高温状态下进行检测。探头可伸入到远处作业，故可应用于工件的狭窄区域、深孔壁等的检

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库